

Optimization of Electromagnetic Wave Absorption Properties in Two-Layer W-Type Hexaferrite-Epoxy Composites with Different FMR Frequencies

Jeong-Jin Kim and Young-Min Kang*

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

Sang-Min Lee

Division of Creative Convergence, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received 5 January 2026, Received in final form 19 January 2026, Accepted 20 January 2026)

In this study, two W-type hexaferrite compositions, $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0.75$ and 1.0), exhibiting different ferromagnetic resonance (FMR) frequencies, were synthesized by the solid-state method and incorporated into epoxy to fabricate single-layer and bilayer composite absorbers. The complex permittivity and permeability of each composite were measured in the 0.1~18 GHz range and used as input parameters for electromagnetic simulations performed using the High Frequency Structure Simulator (HFSS). The simulated reflection loss (RL) spectra showed good agreement with the experimentally measured S11 results, confirming the reliability of the simulation approach. The absorption characteristics of W1 ($x = 1.0$)/W2 ($x = 0.75$) bilayer structures were systematically analyzed by varying the individual layer thicknesses (d_1 , d_2) at fixed total thicknesses (t). While the bilayer configuration did not always outperform the single-layer structure in terms of absolute broadband absorption, it provided significantly enhanced flexibility in tuning the absorption band. By adjusting d_1 and d_2 , the minimum RL (RL_{\min}), as well as the bandwidths satisfying $\text{RL} < -10$ dB (Δf_1) and $\text{RL} < -20$ dB (Δf_2), could be effectively shifted across a wide frequency range. The single-layer W2 composite exhibited the widest bandwidth, achieving $\Delta f_{1,\max} = 10.6$ GHz at $d = 2.13$ mm. In contrast, the bilayer structure enabled optimization of strong-absorption regions, with the condition $t = 2.5$ mm ($d_1 = 0.1$ mm, $d_2 = 2.4$ mm) yielding $\Delta f_{2,\max} = 2.84$ GHz. These results demonstrate that combining W-type hexaferrites with different FMR frequencies in a bilayer configuration does not merely target broadband enhancement but, more importantly, allows precise control over absorption band positioning and impedance-matching conditions.

Keywords : W-type hexaferrite, permeability, reflection loss, EM absorption, HFSS

서로 다른 FMR 주파수를 갖는 W-type 헥사페라이트-에폭시 2층 복합체의 전자기파 흡수 특성 최적화 연구

김정진 · 강영민*

국립한국교통대학교 반도체신소재공학과, 충주시 대학로 50, 27469

이상민

국립한국교통대학교 창의융합학부, 충주시 대학로 50, 27469

(2026년 1월 5일 받음, 2026년 1월 19일 최종수정본 받음, 2026년 1월 20일 게재확정)

본 연구에서는 서로 다른 강자성 공명(FMR) 주파수를 갖는 두 가지 조성의 W-TYPE 헥사페라이트, $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0.75$ 및 1.0)을 고상법으로 합성한 뒤 에폭시와 복합화하여 전자기파 흡수체를 제작하였다. 각 복합체의 복소 유전율과 복소 투자율은 0.1~18 GHz 범위에서 측정되었으며, 이러한 데이터는 고주파 전자기파 시뮬레이션 소프트웨어인 HFSS의 입력값으로 사용되었다. 시뮬레이션을 통해 얻은 반사손실(RL) 스펙트럼은 실측된 S11 결과와 우수한 일치도를 보여, 시뮬레이션 접근법의 신뢰성을 확인하였다. W1($x = 1.0$)/W2($x = 0.75$) 2층 구조의 흡수 특성은 총 두께(t)를 고정한 상태에서 각 층의 두께(d_1 , d_2)를

변화시키는 방식으로 체계적으로 분석되었다. 2층 구조는 절대적인 광대역 성능 측면에서 항상 단층 구조보다 우수한 것은 아니었으나, 흡수대역 조절 능력 측면에서는 상당히 높은 설계 자유도를 제공하였다. d_1 과 d_2 를 조절함으로써 최소 반사손실(RL_{min}) 위치뿐만 아니라 $RL < -10$ dB(Δf_1) 및 $RL < -20$ dB(Δf_2)를 만족하는 대역폭을 넓은 주파수 범위에서 효과적으로 이동시킬 수 있었다. 단층 W2 복합체는 $d = 2.13$ mm에서 최대 $\Delta f_1 = 10.6$ GHz의 가장 넓은 흡수 대역을 나타냈다. 반면 2층 구조는 흡수 영역 조절에 유리하며, 총 두께 $t = 2.5$ mm($d_1 = 0.1$ mm, $d_2 = 2.4$ mm) 조건에서 최대 $\Delta f_2 = 2.84$ GHz를 달성하였다. 이러한 결과는 서로 다른 FMR 주파수를 갖는 두 종류의 W-TYPE 헥사페라이트를 2층 구조로 조합함으로써 단순한 광대역 향상뿐만 아니라 흡수대역 위치 및 임피던스 정합 조건을 정밀하게 제어할 수 있음을 보여준다.

주제어 : W-Type-헥사페라이트, 고주파 투자율, 반사손실, 전자기파 흡수, HFSS

I. 서 론

헥사페라이트(hexaferrite)는 1950년대 초 발견된 이후 탁월한 자성 특성과 넓은 주파수 범위에서의 전자기파 응답 특성으로 인해 레이더, 통신, 전자기파 차폐 및 흡수체 분야에서 지속적으로 연구되어 왔다[1-3]. 특히 M-, W-, Y-, Z-, X-, U의 여섯 가지 유형 중 W-type 헥사페라이트는 $AMe_2Fe_{16}O_{27}$ ($A = Ba$ 또는 Sr ; $Me = Zn, Co, Ni$ 등)의 화학식으로 표현되며 높은 포화자화($M_s = 72\sim 88$ emu/g)와 약 12 kOe 수준의 강한 이방성자계(H_a)를 동시에 갖는 물질이다[2]. 스핀넬(S) 블록과 M형(R) 블록이 SSRSSR 형태로 적층된 결정구조는 조성에 따라 c-axis 또는 c-plane 방향의 자기이방성을 유도하며, 이에 따라 수 GHz~수십 GHz 범위에서 강한 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 특성을 나타낸다[4-8]. 예를 들어 $BaZn_2W$ 의 FMR 주파수는 약 40 GHz에 도달하는 것으로 알려져 있어 W-type 헥사페라이트는 고주파 전자기파 흡수체의 핵심 후보물질로 널리 주목받고 있다.

GHz 이상의 대역에서 헥사페라이트의 전자기파 흡수 기구는 강자성공명(FMR) 현상을 기반으로 하며 복소 투자율 및 복소 유전율, 그리고 흡수체의 두께도 흡수대역 및 흡수 강도를 결정하는데 중요한 인자들이 된다. 헥사페라이트는 2가 금속 이온 치환을 통해 이방성자계(H_a)를 조절함으로써 FMR 주파수를 제어할 수 있어 특정 주파수 대역의 전자기파 흡수 성능을 정밀하게 조절할 수 있는 장점이 있다[8-10]. 그러나 단일 조성을 사용한 단층 구조의 흡수체는 하나의 주된 FMR 주파수에 기반하기 때문에 본질적으로 흡수 주파수 대역과 대역의 폭을 조절하는 데 한계를 가진다. 최근 고주파·광대역 레이더 및 통신 시스템의 발전에 따라 X-band 및 Ku-band 영역에서 넓은 주파수 대역을 동시에 흡수할 수 있는 고성능 전자기파 흡수체의 필요성이 증가하고 있으며, 이에 따라 다층 구조(absorber stack) 기반의 광대역 전자기파 흡수 연구가 더욱 중요해지고 있다[11-13].

다층 흡수체는 각 층의 물성, 두께, 손실 메커니즘이 서로 다르기 때문에 서로 보완적인 흡수 특성을 구현할 수 있다는

장점이 있다. 특히 서로 다른 FMR 주파수를 갖는 W-type 헥사페라이트를 사용한다면, 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역에서 각각 강한 흡수를 유도하여 단층 구조보다 훨씬 넓은 대역폭을 확보할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 그러나 이러한 전략이 실제로 유효한지, 또 어떤 조합과 두께 조건에서 최적의 흡수 성능이 나타나는지에 대한 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 출발하여, 서로 다른 FMR 주파수를 갖는 두 조성의 W-type 헥사페라이트 $Sr_{0.75}Ca_{0.25}Zn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0.75$ and $x = 1.0$)의 에폭시 복합체를 각각 제작하고, 이를 적층한 2층 복합체 구조가 광대역 전자기파 흡수를 실현할 수 있는지 체계적으로 검토하였다. 이를 위해 우선 제조된 복합체에 대해 0.1~18 GHz 범위에서 복소 유전율, 복소 투자율, 그리고 반사 손실(RL) 특성을 도출하였다. 또한 실측된 반사 손실(S11)와 HFSS 시뮬레이션 결과를 비교하여 설계 방법의 신뢰성을 검증하였다. 이어 HFSS 기반 전자기 시뮬레이션을 통해 단층 및 2층 구조에서의 각 층의 두께 변화가 전자기파 흡수 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 서로 다른 FMR 특성을 가진 두 재료를 조합했을 때 흡수 대역이 어떻게 조절되는지, 그리고 최적의 층 배치 및 두께 조합이 무엇인지에 중점을 두고 평가하였다.

연구는 W-type 헥사페라이트의 FMR 조성 제어와 다층 적층 설계를 결합함으로써 고주파 영역에서의 광대역 전자기파 흡수체 개발 가능성을 제시한다. 이는 향후 다양한 조성, 입자 구조 제어, 다층, 다형 구조 설계 등으로 확장될 수 있는 기반을 마련하며, 고성능 경량 전자기파 흡수체의 응용의 확대에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

II. 실험 방법

W-type 헥사페라이트 2개 조성 $Sr_{0.75}Ca_{0.25}Zn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0.75$ and $x = 1.0$)을 일반적인 고상법 공정을 통해 합성하였다. 상세한 분말의 제조 공정 및 X-선 회절 분석을 통한 상합성 결과는 이전 연구[8]에서 이미 보고된 바 있다. 이

후 각각의 조성의 분말들을 에폭시(YD-014, 국도화학)와 혼합한 뒤 토로이드 형태로 성형하여 최종 복합체 시편을 제작하였다. $x = 1.0$ 조성의 복합체를 W1, $x = 0.75$ 조성의 복합체를 W2로 명명한다.

자화 곡선은 ± 25 kOe 범위의 자기장을 인가하며 진동 시료 자력계(VSM, LakeShore 7410)를 사용하여 실온에서 측정하였다. VSM 측정을 위해, 0.1000 g의 하소된 분말 시료를 에폭시 수지에 고정하여 준비하였다. 제작된 토로이드 복합체의 S11 파라미터, 복소 유전율(ϵ' , ϵ''), 복소 투자율(μ' , μ'')은 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, E50356A, Keysight)와 에어라인 키트(85052BR03)를 사용하여 0.1~18 GHz 범위에서 측정하였다. 실제 반사손실(RL) 측정을 위해서는 토로이드 시편을 Cu end 소켓에 부착하여 S11 파라미터를 측정하였으며, 이를 기반으로 실제 RL 값을 평가하였다. 복합체의 복소 유전율 및 투자율 스펙트럼은 Keysight에서 제공하는 소프트웨어(N1500A)로 S-파라미터를 별도로 보정하여 얻었다.

토로이드 형태의 W1, W2 복합체 시편에서 측정된 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' 스펙트럼을 바탕으로 다양한 W1(d_1)/W2(d_2) 2층 구조 모델링을 수행하였으며, 3D 고주파 시뮬레이션 소프트웨어(High Frequency Structure Simulator, HFSS, Ansys)를 이용해 반사손실(RL) 스펙트럼을 계산하였다.

III. 결과 및 토의

Fig. 1는 합성된 두 조성의 W-type 헥사페라이트 $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0.75, 1.0$) 분말의 자화곡선을 보여준다. $x = 0.75$ 에 비해 $x = 1.0$ 시료의 결정자기이방성이 크기 때문에 자화 곡선의 기울기가 완만하며 천천히 자화되는 경향을 보인다. $H = 25$ kOe에서의 자화값으로 정의된 포화자화(M_S) 값과 보자력(H_C) 값은 Table I에 제시하였다.

Fig. 2(a-d)는 $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ powders-epoxy (10 wt.%) 복합체 두 조성 $x = 0.75, 1.0$ 에 대한 고주파 복소 투자율(μ' , μ'') 및 유전율(ϵ' , ϵ'') spectra를 보여준다. Fig. 2(a)에서는 자기이방성이 상대적으로 낮은 $x = 1.0$ 시료가 낮은 주파수 영역에서는 $x = 0.75$ 시료보다 더 높은 투자율 실수부(μ')를 갖지만 2 GHz 부근에서 μ' 값이 역전되어 $x = 0.75$ 시료가 더 높은 μ' 값을 가지며 ~7 GHz 부근까지 투

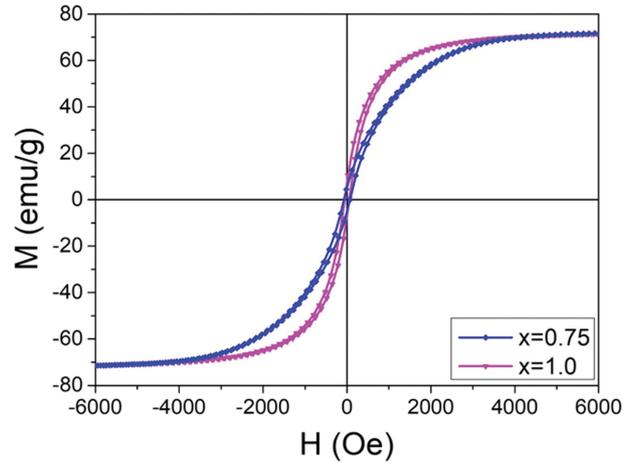


Fig. 1. (Color online) M-H curves of the $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ powders with (a) $x = 0.75, 1.0$.

자율 값이 유지되다가 떨어지는 경향을 보인다. Fig. 2(b)의 투자율 허수부 spectra는 자기적 손실과 관련되어 있으며, 결정자기이방성인 낮은 $x = 1.0$ 시료는 자구의 운동과 전자 스핀의 운동에 의한 신호가 중복되어 있으며 broad한 peak으로 나타나며, 결정자기이방성이 상대적으로 높은 $x = 0.75$ 시료는 1 GHz 부근과 8 GHz 부근의 두 개의 peak이 각각 자구의 운동과 전자 스핀의 공진에 의한 자기적 흡수 기구로 해석할 수 있다. 헥사페라이트에서 $f > 1$ GHz 이상의 범위에서 보이는 투자율 허수부의 peak은 강자성공명 주파수로 볼 수 있다. 한편 Fig. 2(c)의 유전율 실수부는 두 시료가 유사하게 $\epsilon' = \sim 7$ 정도의 값으로 주파수에 따라 일정한 spectra를 보이며, 유전율의 허수부는 0에 가까운 값으로 나타난다. 이는 본 헥사페라이트 시료는 주로 자기적인 흡수기구로 전자기파를 흡수하며 유전율 값은 임피던스 정합 조건에 관련이 있으나 전하의 운동과 관련된 유전적인 흡수 기구는 무시할 수 있을 정도라고 여길 수 있다. 주파수에 따른 투자율 및 유전율 spectra(μ' , μ'' , ϵ' , ϵ'')는 두께에 무관하며 헥사페라이트 조성에 의존하는 복합체 시료의 고유한 물질성으로 HFSS 계산의 기초 data로 활용하게 된다.

전자기파 흡수 특성, 즉 반사손실(RL)은 재료의 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' 값을 이용하여 계산할 수 있다. 계산은 전송선 이론(transmission line theory)[14]에 기반하며, 다음의 식(1)와 (2)를 사용한다.

Table I. Saturation magnetization (M_S), coercivity (H_C), FMR frequency (f_{FMR}), minimum reflection loss (RL_{min}), frequency of RL_{min} (f_{RLmin}), and thickness of RL_{min} (d_{RLmin}) of the $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ -epoxy (10 wt.%) composites with $x = 0.75, 1.0$.

x	M_S (emu/g)	H_C (Oe)	f_{FMR} (GHz)	f_{RLmin} (GHz)	RL_{min} (GHz)	d_{RLmin} (mm)
0.75	74.2	73.8	7.8	11.7	-30.6	2.1
1.0	73.4	54.0	2.5	3.32	-41.5	5.1

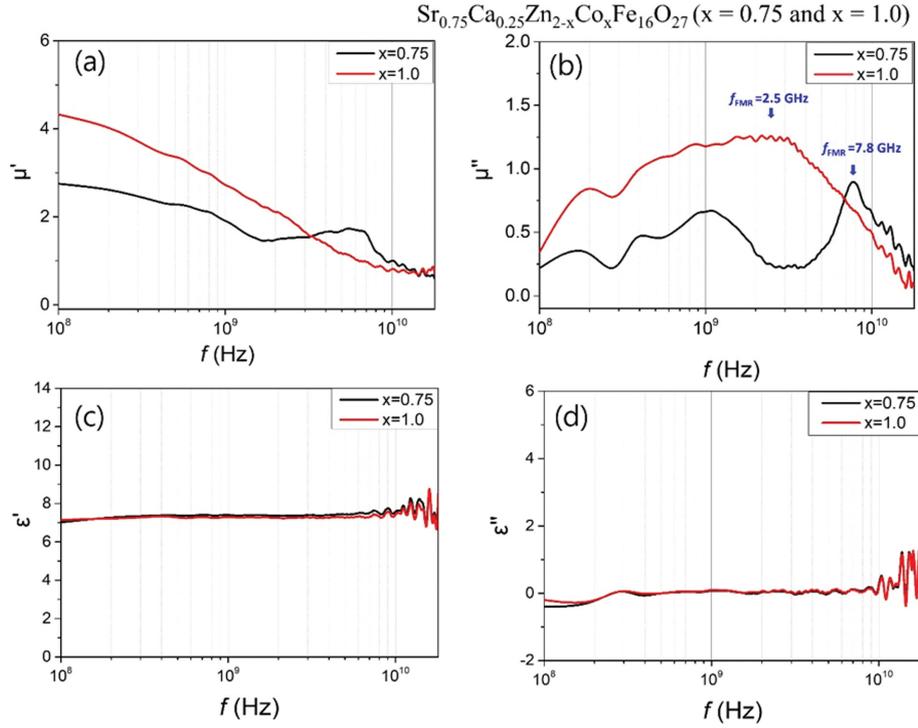


Fig. 2. (Color online) (a, b) complex permeability and permittivity (μ' , μ'' , ϵ' , and ϵ'') spectra ($0.1 \leq f \leq 18$ GHz) of the $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ powders-epoxy (10 wt.%) composites with $x = 0.75, 1.0$.

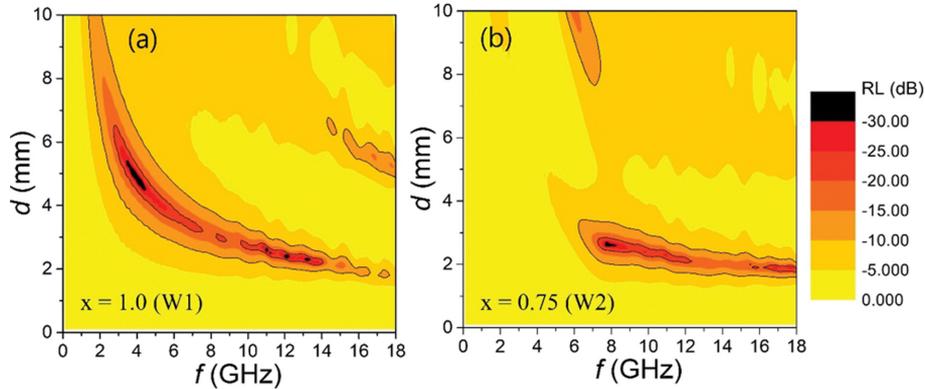


Fig. 3. (Color online) (a, b) RL maps of the $\text{Sr}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ powders-epoxy (10 wt.%) composites with $x = 0.75, 1.0$.

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$RL \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{\frac{Z_{in}}{Z_0} - 1}{\frac{Z_{in}}{Z_0} + 1} \right| \quad (2)$$

이 식에서 Z_{in} 은 재료의 입력 임피던스, Z_0 는 자유공간의 임피던스를 의미한다. 또한 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ and $\mu_r = \mu' - j\mu''$ 은 각각 재료의 복소 유전율과 복소 투자율을 나타낸다.

반사손실(RL)은 주파수에 따른 Fig. 2(a)-2(d)에서 측정된

ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' 값을 이용하여 식(1)와 (2)에 따라 계산하였다. Fig. 3(a), (b)의 RL map에서 가장 바깥쪽 실선은 $RL \leq -10$ dB 영역을 나타내며, 이 실선 안쪽은 입사 전자기파 에너지의 90% 이상이 흡수됨을 의미한다. 그다음 안쪽 실선은 $RL \leq -20$ dB 영역으로, 에너지의 99% 이상이 흡수됨을 나타낸다. 이와 같은 방식으로 세 번째와 네 번째 실선의 안쪽 영역은 각각 $RL \leq -30$ dB 및 $RL \leq -40$ dB 영역에 해당하며, 에너지의 99.9%와 99.99% 이상이 흡수되는 영역을 의미한다.

Fig. 3(a)의 $x = 1.0$ 조성은 3~4 GHz 주파수 범위, 5 mm 두께를 중심으로 강한 흡수 영역을 가지며 좌상단에서 우하

단으로 넓게 퍼지는 광범위한 흡수 영역이 관찰된다. 반면 보다 높은 결정자기이방성과 FMR 주파수를 갖는 $x = 0.75$ 조성의 복합체는 2~3 mm 두께 영역에서 7~18 GHz 범위로 가로로 넓게 퍼져 있는 흡수 영역을 보인다.

Fig. 4(a-c)에서는 HFSS 계산의 신뢰성을 검증하기 위해 고주파 유전율 및 투자율 평가에 사용되었던 복합체 W1, W2 그리고 이들을 적층하여 붙인 W1/W2 시료에 대하여 HFSS계산을 통해 얻은 RL spectra와 S11을 통한 실측 RL spectra를 비교하여 제시하였다. Fig. 4(a)는 $x = 0.75$ 조성의 복합체(W2), Fig. 4(b)는 $x = 1.0$ 조성의 복합체(W1) 그리

고 Fig. 4(c)는 W1/W2 적층 구조 복합체에 대해 측정된 RL spectra(붉은 곡선)와 계산된 spectra(검은 곡선)를 동시에 plot하여 나타내었다. Fig. 4(d)는 RL 실측정을 위한 set-up의 개략적으로 보여주는 그림이다. W1/W2 적층 시료 측정 시 적층 순서는 Cu-end 쪽에 W1이 붙어 있는 Cu/W1/W2 구조이다. W1, W2 각각의 단층을 측정할 경우 HFSS 계산과 실측 RL spectra 결과는 약간의 오차를 보이나 W1/W2 적층의 경우 계산과 실측이 매우 우수한 일치도를 보인다. 이후의 결과 부터는 W1, W2 층의 두께를 d_1 , d_2 라고 할 때 d_1 , d_2 층의 두께를 체계적으로 변화시켜 가면서 RL 특성의

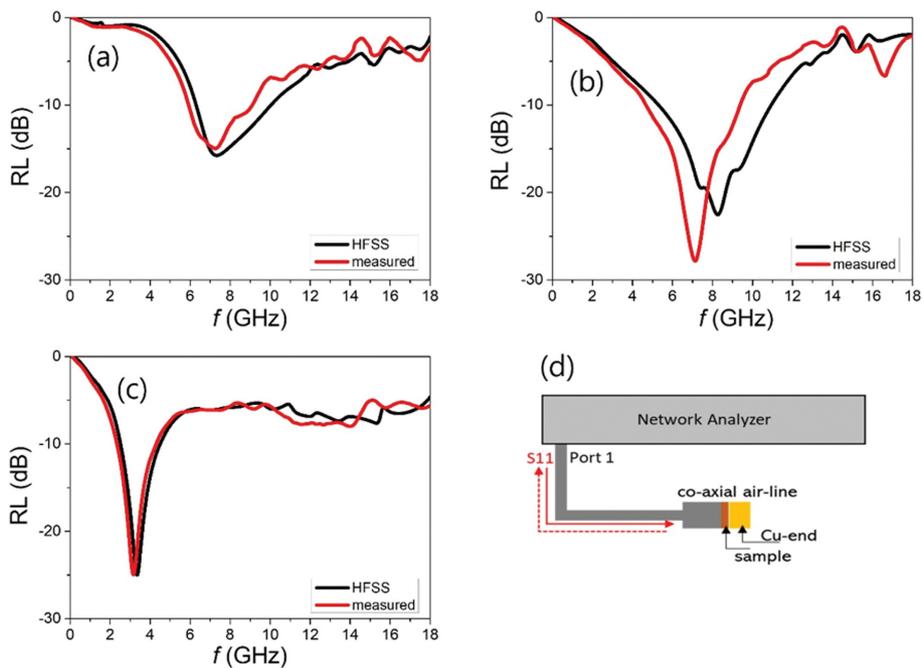


Fig. 4. (Color online) RL spectra of (a) the W2 composite ($x = 0.75$, $d = 2.98$ mm), (b) the W1 composite ($x = 1.0$, $d = 3.10$ mm), and (c) the stacked W1 (3.10 mm)/W2 (2.98 mm) samples, obtained from both HFSS simulations and S11 measurements; (d) a schematic diagram of the S11 measurement setup.

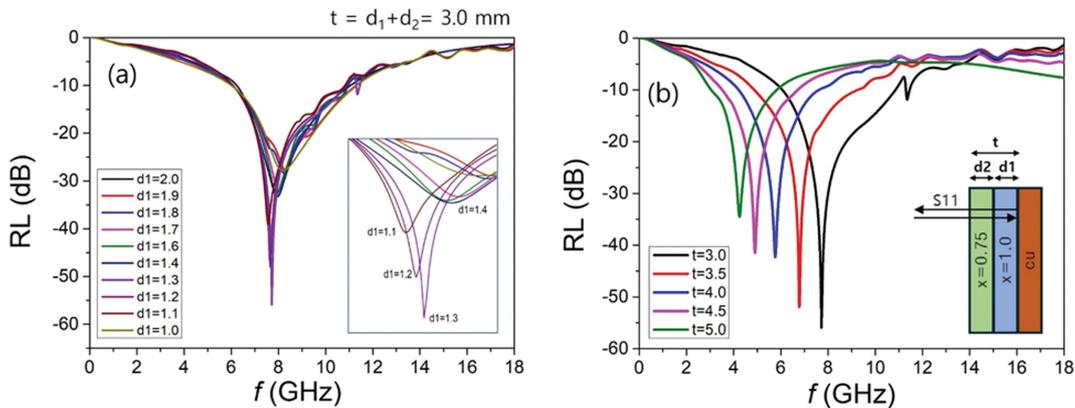


Fig. 5. (Color online) (a) RL spectra of W1/W2 stacked composites for various combinations of layer thicknesses d_1 and d_2 with the total thickness fixed at 3.0 mm, and (b) RL spectra of W1/W2 composites with total thicknesses of 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, and 5.0 mm, where d_1 and d_2 were optimized at each total thickness to achieve the maximum $|RL_{min}|$.

Table II. Optimized layer thicknesses of the W1 and W2 layers (d_1 and d_2) that yield minimum reflection loss (RL_{\min}) in W1/W2 bilayer absorber for each total thickness ($t = 3.0, 3.5, 4.0, 4.5,$ and 5.0 mm), along with the corresponding RL_{\min} and its frequency ($f_{RL,\min}$).

t (mm)	Optimized thickness (mm)		RL_{\min} (dB)	$f_{RL,\min}$ (GHz)
	d_1	d_2		
3.0	1.30	1.70	-54.3	7.72
3.5	2.25	1.25	-51.4	6.78
4.0	2.40	1.60	-42.0	5.75
4.5	2.65	1.85	-41.1	4.91
5.0	3.00	2.00	-34.4	4.24

변화를 연구하였다.

Fig. 5(a)는 W1, W2층의 두께의 t 를 3.0 mm로 고정하고 d_1 을 1.0 mm에서 2.0 mm 까지 0.1 mm 두께 간격으로 변화시켜 갔을 때 RL spectra 계산 결과이다. 이때 $d_2 = 3$ mm - d_1 이 된다. 총 두께 t 가 변화가 없을 때 RL spectra의 주파수 범위는 의미 있게 변하지 않고 최대 흡수를 의미하는 RL_{\min} 의 절대값이 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)의 inset에 확대하여 나타낸 영역을 보면 $d_1 = 1.3$ mm일 때($d_2 = 1.7$ mm일 때) $RL_{\min} = -54.3$ dB로 그 절대값이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이런 식으로 총두께 $t = 3.5, 4.0, 4.5, 5.0$ mm 각각의 값으로 고정하고 d_1, d_2 를 변화시켜 RL_{\min} 의 절대값이 커지는 경우에 대해 RL spectra를 도출하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. 각 t 에 대해 이를 만족시키는 d_1, d_2 값은 Table II에 나타내고 그때의 주파수($f_{RL,\min}$)와 RL_{\min} 값도 함께 제시하였다. Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이 t 가 증가할수록 최대 흡수가 발생하는 주파수는 단계적으로 감소하며 RL_{\min} 절대값도 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 W1, W2 적층 시료에 대한 임피던스 정합 조건과 관련된 것으로 총 두께가 3 mm에서 더 커질수록 최대 흡수 특성을 불리해지는 것을 알 수 있다.

다음으로 W1/W2 적층 구조에서 $RL < -10$ dB 또는 $RL < -20$ dB을 만족하는 주파수 범위가 큰 조건을 찾는 것으로 광대역 흡수를 만족하는 조건을 찾기 위한 계산을 실시하였다. Fig. 3의 RL map을 보면 $x = 0.75$ (W2) 시료가 2.0~2.5 mm 두께 범위에서 넓은 주파수 범위로 흡수 영역이 가로로 펼쳐져 있는 것을 바탕으로 총 두께(t)를 1.9~2.75 mm 범위로 한정하고 d_1 값을 0부터 단계적으로 증가시키며 RL spectra를 계산하고자 하였다. 우선 $t = 2.5$ mm의 경우 d_1 이 0에서 1.0 mm까지 0.1 mm 간격으로 증가되어 갈 때 RL spectra를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 또한 d_1 값에 따른 $RL < -10$ dB을 만족하는 주파수 폭(Δf_1) 그리고 $RL < -20$ dB을 만족하는 주파수 폭(Δf_2) 값의 변화를 Fig. 6(b), (c)에 각각 plot하였다. 이런 식으로 하여 각 t 에 대해

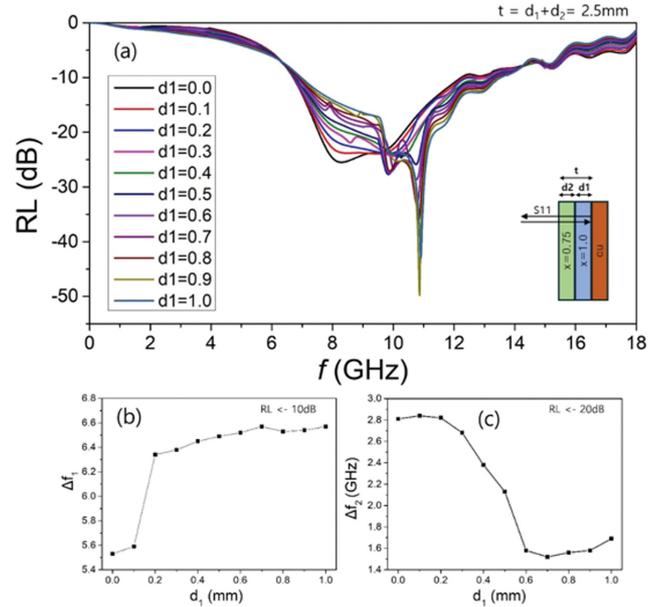


Fig. 6. (Color online) (a) RL spectra of the W1/W2 bilayer absorber at a fixed total thickness of $t = 2.5$ mm as d_1 increases from 0 to 1.0 mm in steps of 0.1 mm, and the variations in the bandwidths satisfying (b) $RL < -10$ dB (Δf_1) and (c) $RL < -20$ dB (Δf_2) as functions of d_1 at $t = 2.5$ mm.

Table III. Optimized thicknesses of W1 and W2 layers (d_1 and d_2) that yield the maximum bandwidth satisfying $RL < -10$ dB ($\Delta f_{1,\max}$) for each total thickness t (1.9~2.75 mm), along with the corresponding $\Delta f_{1,\max}$ values.

t (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	$\Delta f_{1,\max}$ (GHz)
1.9	0.0	1.9	≥ 7.55 GHz
2.0	0.0	2.0	≥ 9.95 GHz
2.04	0.0	2.04	≥ 10.40 GHz
2.05	0.0	2.05	≥ 10.39 GHz
2.06	0.0	2.06	10.43 GHz
2.1	0.0	2.1	10.52 GHz
2.11	0.0	2.11	10.53 GHz
2.12	0.0	2.12	10.53 GHz
2.13	0.0	2.13	10.60 GHz
2.14	0.0	2.14	10.51 GHz
2.2	0.0	2.2	9.43 GHz
2.25	0.1	2.15	8.60 GHz
2.3	0.2	2.1	8.51 GHz
2.5	0.7 or 1.0	1.8 or 1.5	6.57 GHz
2.75	1.0	1.75	5.42 GHz

Δf_1 및 Δf_2 값이 최대가 되는 조건을 도출하고자 하였다. 1.9~2.75 mm 범위의 정해진 t 값에 대해 최대 Δf_1 및 최대 Δf_2 를 만족하는 d_1, d_2 값과 함께 그 때의 주파수 폭의 값 $\Delta f_{1,\max}$ 와 $\Delta f_{2,\max}$ 를 Table III, Table IV에 각각 제시하였다. 먼저 Table III에서 $t \leq 2.05$ mm 에서는 흡수 영역이 측정 범위인 18 GHz 이상을 넘어가기 때문에 정확한 $\Delta f_{1,\max}$ 값

Table IV. Optimized thicknesses of W1 and W2 layers (d_1 and d_2) that yield the maximum bandwidth satisfying $RL < -20$ dB ($\Delta f_{2,max}$) for each total thickness t (1.9~2.75 mm), along with the corresponding $\Delta f_{2,max}$ values.

t (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	$\Delta f_{2,max}$ (GHz)
1.9	0.1	1.8	2.38 GHz
2.0	0.4	1.6	1.88 GHz
2.05	0.3	1.75	1.74 GHz
2.06	0.3	1.76	2.76 GHz
2.1	0.3	1.8	2.08 GHz
2.11	0.3	1.81	1.91 GHz
2.12	0.3	1.82	1.79 GHz
2.13	0.3	1.83	2.05 GHz
2.14	0.0	2.14	2.06 GHz
2.2	0.4	1.8	2.01 GHz
2.25	1.0	1.25	2.17 GHz
2.3	0.4	1.9	1.43 GHz
2.5	0.1	2.4	2.84 GHz
2.75	1.0	1.75	2.58 GHz

을 도출하기는 어렵다. $2.0 \leq t \leq 2.2$ mm까지는 $d_1 = 0$ 일 때, 곧 단층의 W2를 사용할 때 가장 우수한 광대역 특성을 만족하였고, $\Delta f_{1,max}$ 값은 10 GHz 이상의 값을 보였다. 최대 흡수 특성은 $t = d_2 = 2.13$ mm일 때 $\Delta f_{1,max} = 10.6$ GHz를 보이며 가장 우수한 광대역 흡수 특성을 보였다. 한편, $RL < -20$ dB을 만족하는 범위를 최적화한 결과값을 제시한 Table IV에서는 $\Delta f_{2,max}$ 값을 도출하기 위한 조건은 W1 층을 주로 사용하고 상대적으로 얇은 두께의 W2 층을 적층한 경우로 나타났다. 가장 우수한 광대역 특성은 $t = 2.5$ ($d_1 = 0.1$, $d_2 = 2.4$)일 때 $\Delta f_{2,max} = 2.84$ GHz를 만족하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 FMR 주파수를 갖는 두 조성의 W-type 헥사페라이트 복합체(W1, W2)를 단층 및 2층 구조로 구성하여 전자기파 흡수 특성을 분석하고, HFSS 시뮬레이션을 통해 두께 변화가 흡수 성능에 미치는 영향을 체계적으로 검토하였다. 측정된 복소 유전율-투자율 데이터를 기반으로 한 HFSS 계산은 실측 RL 결과와 높은 일치도를 보여, 적층 구조의 흡수 특성을 예측하고 최적화하는 데 신뢰성 있는 도구임을 확인하였다. 단층 구조와 비교했을 때, 2층 W1/W2 구조가 항상 더 넓은 흡수 대역폭을 제공하는 것은 아니었으나, 두 재료 특성의 조합과 두께 분포를 조절함으로써 흡수 중심 주파수의 이동, 흡수 강도의 조정, 그리고 특정 목표 대역에 대한 설계 자유도 증가라는 중요한 이점을 확인할 수 있었다. 특히 총 두께(t)를 고정한 상태에서 d_1 , d_2 를 변화시키면 RL_{min} 위치가 넓은 범위에서 이동하며, $RL < -10$ dB 또는 $RL < -20$ dB 조건을 만족하는 주파수 구간을 쉽게

조절할 수 있었다. 이는 2층 구조가 단층보다 흡수 대역의 선택적 배치 및 응용 주파수대의 정밀 설계를 가능하게 하는 구조적 장점을 가진다는 점을 의미한다. 최적 설계 결과, 단층 W2($d = 2.13$ mm)는 $RL < -10$ dB 기준에서 $\Delta f_{1,max} = 10.6$ GHz의 가장 넓은 대역을 보였고, 2층 구조는 $RL < -20$ dB 흡수 대역을 특정 주파수 범위에 맞추어 집중시키는 데 유리하였고 가장 우수한 광대역 특성을 $d_1 = 0.1$ mm, $d_2 = 2.4$ mm에서 $\Delta f_{2,max} = 2.84$ GHz를 보였다. 종합적으로, 흡수 주파수 대역이 다른 두 헥사페라이트의 적층 구조는 단층 구조 대비 주파수 선택성, 흡수대역 조절, 설계 적응성 측면에서 우수한 유연성을 제공하며, 향후 다양한 헥사페라이트 조성 및 패턴화 구조 도입 전략과 결합할 경우 더욱 정밀한 전자기파 흡수체 설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구 논문은 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심대학지원체제(RISE)의 결과물입니다(2025-RISE-11-004-03).

References

- [1] J. Smit and H. P. J. Wijn, Ferrites, Philips' Technical Library, Eindhoven, Netherlands (1959), pp. 177~211.
- [2] R. C. Pullar, Prog. Mater. Sci. **57**, 1191 (2012).
- [3] L. B. Kong, Z. W. Li, L. Liu, R. Huang, M. Abshinova, Z. H. Yang, C. B. Tang, P. K. Tan, C. R. Deng, and S. Matitsine, Inter. Mater. Rev. **28**, 203 (2013).
- [4] S. P. Ruan, B. K. Xu, H. Suo, F. Q. Wu, S. Q. Xiang, and M. Y. Zhao, J. Magn. Magn. Mater. **212**, 175 (2000).
- [5] Y. J. Kim and S. S. Kim, IEEE Trans. Magn. **38**, 3108 (2002).
- [6] Z. W. Li, L. F. Chen, and C. K. Ong, J. Appl. Phys. **94**, 5918 (2003).
- [7] L. Chang, X. Ren, H. Yin, Y. Tang, X. Pu, and H. Yuan, J. Mater. Sci.: Mater Electron **31**, 20908 (2020).
- [8] S.-M. Lee, T.-W. Lee, and Y.-M. Kang, J. Alloy. Compd. **962**, 171060 (2023).
- [9] E.-S. Lim, H. KD Kim, and Y.-M. Kang, J. Magn. Magn. Mater. **517**, 167397 (2021).
- [10] J.-U. Kim and Y.-M. Kang, Appl. Sci. **11**, 8669 (2021).
- [11] Y.-M. Kang, J.-U. Kim, J.-H. Heo, and S.-M. Lee, J. Korean Magn. Soc. **32**, 278 (2022).
- [12] J.-H. Heo, T.-W. Lee, Y.-M. Kang, and S.-M. Lee, Korean J. Met. Mater. **62**, 868 (2024).
- [13] J.-H. Heo, Y.-M. Kang, and S.-M. Lee, Korean J. Met. Mater. **63**, 955 (2025).
- [14] Y. Naito and K. Suetake, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **19**, 65 (1971).